

הצעה להוראת דו"ח ה- IPCC בכיתה

ד"ר הגר ליס, אגף מדעים במזכירות הפדגוגית, משרד החינוך



לאחרונה פרסמה ד"ר הגר ליס, מומחית בתחום מדעי כדה"א, אוקיאנוגרפיה ומורה לביולוגיה בתיכון למדעים ואומנויות בירושלים, סקירה נרחבת ומקיפה על האופן בו ניתן לקיים בשיעורים דיונים מעמיקים על דו"ח ה-IPCC, תוך שילוב של גרפים מתורגמים, הסברים והרחבות. להלן החלק הראשון של המסמך, ובו הצעות היכולות להוות בסיס למערך שיעור סביב הנתונים והמסקנות של דו"ח ה-IPCC. ההצעות הללו אינן מהוות מערך שיעור בפני עצמן, אך יכולות להיות בעלות ערך רב עבור מורים המעוניינים לשלב את הנושא החשוב הזה במסגרת הוראתם בכיתה.

מורים המעוניינים להעמיק בנושאים נוספים כגון: השפעות של גורמים שונים על טמפרטורת כדה"א, כיצד העתיד האקלימי עשוי להראות, ונתונים על שינויי טמפרטורה ומשקעים בעולם, מוזמנים לקרוא את המסמך המלא [בקישור](#).

◆ מדוע הסקירה כוללת רק פרסומים שעברו ביקורת עמיתים?

ביקורת עמיתים (peer review) היא הליך שיפוט חיצוני לבחינת מחקר מדעי. ההליך מהווה שלב חשוב לפני פרסום תוצאות המחקר כמאמר מדעי. בתהליך ביקורת עמיתים, מומחים בתחום שבו עוסק המחקר בוחנים האם הוא ראוי לפרסום, או האם הוא צריך לעבור תיקונים טרם פרסומו. ביקורת עמיתים תורמת לאמינות של הידע המדעי ומטרתה לאתר אי-דיוקים, טעויות והטיות בפרסומים מדעיים.

◆ למה הדו"ח עצמו עובר לביקורת עמיתים?

גם סינתזה של ידע מדעי עלולה להיות מושפעת מהטיות, טעויות או אי-דיוקים. לכן יש חשיבות לביקורת עמיתים שבוחנת את האמינות של התוצר הסופי. דו"ח ה-IPCC רגיש במיוחד מבחינה פוליטית, כלכלית וחברתית ולכן חשוב לשמור על אובייקטיביות במידה מירבית.

א. שאלות לדיון ודגשים כללים בנוגע לדו"ח ה-IPCC:

◆ יותר מ-200 מדענים היו שותפים לכתיבת הדו"ח במשך שלוש שנים. מדוע מספר כה גדול של מחברים שותפים לכתיבת דו"ח אחד?

מערכת האקלים היא מערכת מורכבת. ההבנה שלה והמחקר בתחום מחייבים שיתוף פעולה בין מדענים העוסקים במגוון רחב של תחומים: פיזיקה, כימיה, גיאולוגיה, ביולוגיה, מתמטיקה, סטטיסטיקה, מחשבים ועוד... מעבר לכך, בכל שנה יוצאים אלפי פרסומים בנושא. תהליך הכתיבה עצמו מלווה בדיונים ממושכים במטרה להגיע להסכמות של כל המחברים.



◆ מה מלמד אותנו השימוש במונח "חד משמעי" בדו"ח ה-IPCC השישי?

השימוש במונח "חד משמעי" נדיר בשפה המדעית. השימוש במונח מעיד על מידת הוודאות ועל ההסכמה הרחבה בקרב מדעני אקלים. כמו שתאוריית האבולוציה או הקשר בין עישון סיגריות לבין הסיכוי לחלות בסרטן ריאות מקובלים כעובדה בעולם המדעי, כך גם הקשר הסיבתי בין פליטת גזי חממה ע"י האדם לבין התחממות גלובלית ומשבר האקלים. מידת הוודאות עולה כיוון שקיים גוף נתונים הכולל ראיות רבות ובלתי תלויות, אשר תומכות באותה מסקנה. כאן ההזדמנות לחזק את ההבנה של המונחים - עובדה, השערה, תיאוריה מדעית וכו'... [ראו יחידת הוראה דיגיטלית מבוא למשבר האקלים שיעור 8. \(ראו סרטון\)](#)

ג. שינויים בטמפרטורה העולמית הממוצעת של פני השטח של כדור הארץ ביחס לטמפרטורה העולמית הממוצעת בין השנים 1850-1900

הסבר מקדים: מדעני אקלים בדרך כלל מציגים את השינוי בטמפרטורה (או מה שמכונה אנומליית טמפרטורה) במקום טמפרטורה מוחלטת. השינוי בטמפרטורה מציג את הסטייה של הטמפרטורה הנמדדת מערך מוגדר - בדרך כלל ממוצע ארוך טווח. ערכים חיוביים מעידים על עלייה בטמפרטורה ביחס לממוצע בעוד שערכים שליליים מעידים על ירידה. להסבר נוסף, היכנסו [לקישור](#) (אנגלית) או צפו [בסרטון](#) בין 3:40 - 5:26 דקות (אנגלית, ניתן להפעיל תרגום אוטומטי). גרף אנומליה מופיע בהמשך. בכל דו"ח של ה-IPCC הטמפרטורה העולמית הממוצעת (להלן טמפרטורה ממוצעת) בין השנים 1900-1850 מהווה קו-ייחוס, שמולו מכמתים את מידת התחממות. בחירה זו אינה שרירותית. כדי לכמת את השפעת פעילות האדם על טמפרטורת כדור הארץ, צריך להשוות את הטמפרטורות הנמדדות היום לאלו ששררו על פני כדור הארץ לפני התערבות האדם (אך עדיין בנוכחותו). מוסכם על מדענים להשוות לתקופה שקדמה למהפכה התעשייתית. חשוב לזכור כי ככל שהולכים אחורה בזמן, יש בידינו פחות נתונים על מדידות ישירות של טמפרטורה. לכן הגדרת קו הייחוס של ה-IPCC היא פשרה בין האמינות של המדידות הישירות של הטמפרטורה לבין בחירת תקופה שמייצגת את כדור הארץ לפני המהפכה התעשייתית. לדיון יותר מעמיק ראו את [התשובה של צוות ה-IPCC](#) (עמוד 7, אנגלית).

◆ מדוע ביקורת עמיתים על פרסום מסוים נעשית ע"י מומחים שלא שותפים לכתיבת הפרסום?

כדי למנוע ניגוד אינטרסים ולהעלות את מידת האובייקטיביות.

ב. שימוש בשפה חד משמעית בדו"ח

מחברי הדו"ח השישי של ה-IPCC מסיקים כי קיים קשר סיבתי **"חד-משמעי"** בין פעילות האדם בכלל, ופליטת גזי חממה לאטמוספירה בפרט, לבין התחממות כדור הארץ, וזו גורמת לשינויים במערכות כדה"א שהם **"חסרי תקדים"** בהשוואה למאות או אפילו אלפי השנים האחרונות. למעשה, מאז פרסום הדו"ח הראשון של ה-IPCC ב-1990, זוהי הפעם הראשונה שנוסח הדו"ח הוא חד משמעי ואינו מותיר מקום לספק.

מעניין להשוות את ניסוח הדו"ח הנוכחי לניסוחים בדו"חות הקודמים בהקשר של הקשר הסיבתי בין התחממות כדה"א לפליטת גזי חממה ע"י האדם. בשנים קודמות השתמשו במילים כמו **"מסוגל"** (1990), **"עשוי"** (1995), **"כנראה"** (2001), **"התכנות סבירה"** (2007) ו**"התכנות גבוהה"** (2013). אבל, בדו"ח הנוכחי מופיע המונח **"חד משמעי"** (2021). [בקישור](#) תוכלו למצוא טבלה המפרטת את הביטויים המדויקים באנגלית.

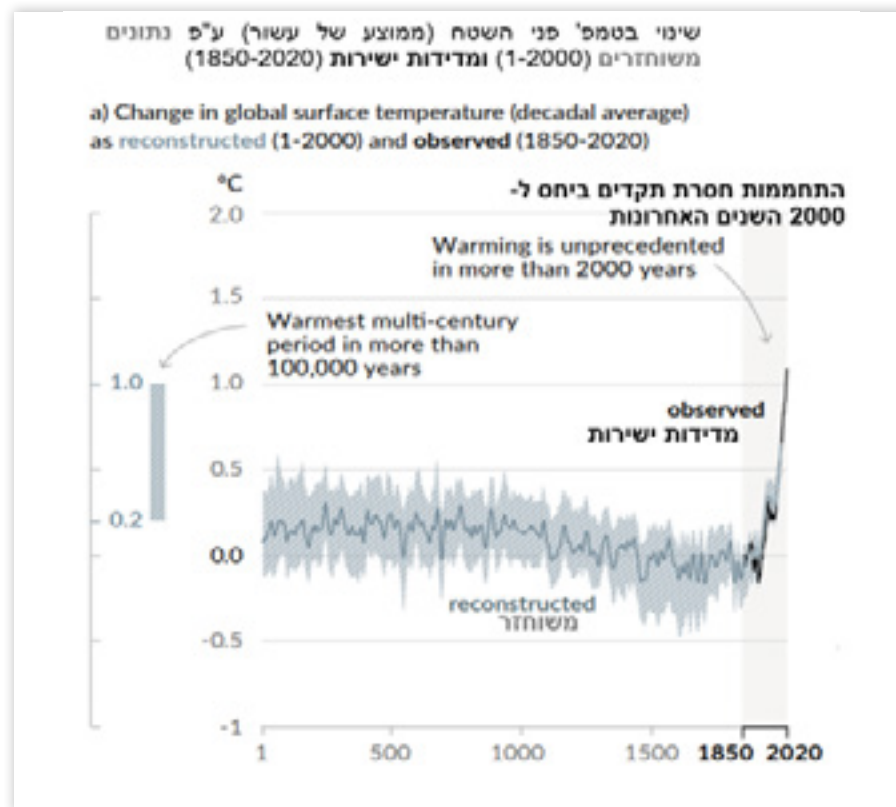
הצעה לשאלות לדיון ודגשים:

◆ מדוע מדענים בדרך כלל זהירים בתיאור המסקנות שלהם (שימוש במילים כמו "ייתכן" או "עשוי" או "מרמז")?

בהרבה מקרים אפשר למצוא יותר מהסבר אחד לתוצאות מסוימות. כמו כן יש יותר מדרך אחת לקשר בין גורמים (האם X גורם ל-Y או אולי Y גורם ל-X או אולי X ו-Y קשורים לגורם שלישי וכו'...). ניתן לתת דוגמה מניסויים שהתלמידים עצמם עשו בכיתה: למשל, בניסוי הבוחן את השפעת מלח על נביטת זרעים ניתן למצוא כמה וכמה הסברים לכך שבטיפול מסוים הזרעים לא נבטו: הזרעים לא נבטו כי הוספתי מלח, או הזרעים לא נבטו כי שכחתי להשקות, או הזרעים לא נבטו כי היה חורף והטמפרטורה הייתה נמוכה וכו'... ולכן חשוב מאוד לבדוד משתנים עד כמה שאפשר בניסוי בקרה. במקרה של מערכות אקלים והשפעת האדם אין אפשרות להשוות לקבוצת בקרה. כמו כן, ככל שמדובר במערכות יותר מורכבות, כך גם יותר קשה להראות קשרים חד משמעיים בין הגורמים. סיבה נוספת לניסוחים זהירים היא כי רעיונות מדעיים מתעדכנים כל הזמן כשמתגלים ממצאים חדשים.

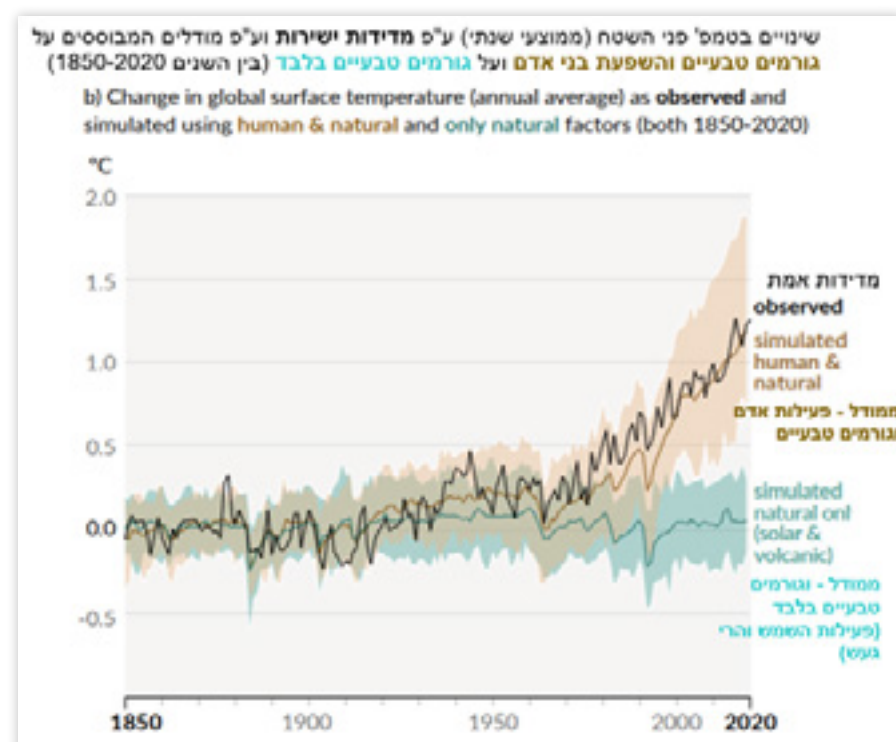
הסבר גרף a1: ציר ה-X מתאר זמן (בשנים) משנת 1 לספירה ועד הווה. ציר ה-Y מציג את השינוי בטמפרטורה ביחס לטמפרטורה הממוצעת בין השנים 1850-1900. ערכים חיוביים מעידים על התחממות ביחס לטמפרטורה הממוצעת, וערכים שליליים מעידים על התקררות ביחס אליה. הקו האפור מייצג [טמפרטורות משוחזרות](#).

מהעבר. האזור הצבוע סביב הקו מציג את טווח האי-ודאות של שחזור זה. הקו השחור מתאר שינויים בטמפרטורה שהתקבלו ממדידות ישירות. ההתחממות בהווה היא חסרת תקדים בהיסטוריה של 2000 השנים האחרונות. ניתן לראות שעד 2020, כדור הארץ התחמם מעל מעלה אחת ביחס לטמפרטורה הממוצעת בין השנים 1850-1900.



הסבר גרף b1: ציר ה-X מציג זמן בין השנים 1850 ל-2020. ציר ה-Y מציג שינוי בטמפרטורה ביחס לטמפרטורה הממוצעת בין השנים 1900-1850. כל נקודה מייצגת ממוצע שנתי של טמפרטורה. הקו השחור מראה מדידות ישירות, בעוד שהקווים האחרים (ירוק וחום) מייצגים תוצאות חישוביות המבוססות על מודלים שלוקחים בחשבון גורמים שונים אשר משפיעים על טמפרטורת כדור הארץ:

*הקו הירוק מייצג מודל בו שינויים בטמפרטורת כדור הארץ מושפעים רק מגורמים טבעיים - פעילות הרי געש ושינויים בפעילות השמש. ניתן לראות שמודל זה אינו צופה שינוי משמעותי בטמפרטורה ממוצעת. *הקו החום מייצג מודל בו שינויי הטמפרטורה מושפעים הן מגורמים טבעיים והן מפעילות האדם. *האזורים הצבועים מראים את טווח אי-הודאות של הנתונים.





הצעה לשאלות לדיון ודגשים:

- ◆ תארו את הגרפים: מה מייצג ציר X? מה מייצג ציר Y? מה מייצג כל עקום?
- ◆ מהי המשמעות של ערכים שליליים /חיוביים בשינוי בטמפרטורה (ציר Y)?

התשובות לשאלות הנ"ל נמצאות בהסבר. עם זאת, כיוון שהגרפים מורכבים כדאי להקדים ולהבין מה הם מציגים לפני דיון על המסקנות והפרשנות.

◆ בגרפים ניתן לראות אזורים צבועים אשר מסמנים את טווח האי-וודאות. מה הכוונה לאי-וודאות במובן המדעי?

ביומיום, כאשר אנו אומרים שמהשו לא ודאי, אנחנו מתכוונים למשהו שלא יודעים או בטוחים לגביו. בעולם המדע, לביטוי "אי ודאות" יש משמעות שונה, המתארת את רמת הביטחון שיש למדענים בממצא או בתוצאה מסוימת. אי הוודאות יכולה לנבוא, למשל, ממכשירי המדידה. למשל, כאשר מודדים טמפרטורת גוף, אי הוודאות נובעת מחוסר הדיוק במדידה. הערכים המתקבלים במדידות חוזרות מפוזרים לרוב סביב הערך האמיתי שמנסים לאמוד וטווח הערכים המתקבל הוא אי הוודאות של המדידה.

◆ מדוע מציגים שינוי בטמפרטורה ולא טמפרטורה ממוצעת?

השינוי בטמפרטורה (או מה שמכונה אנומליית טמפרטורה) היא דרך נוחה להציג סטייה (עלייה או ירידה) ביחס לנקודת ייחוס מסוימת. נקודת הייחוס שהוחלט עליה היא ממוצע הטמפרטורה הרב-שנתית בין השנים 1850-1900 (ראו השאלה הבאה). בנוסף, כאשר אנו מחשבים ממוצע של טמפרטורות באזור מסוים, למיקום תחנות המדידה יש השפעה משמעותית על החישוב. למשל, בתחנות הממוקמות באזורים גבוהים או באזורים כפריים נמדדות בדרך כלל טמפרטורות יותר נמוכות מאלו הנמדדות בתחנות הממוקמות בעמקים או באזורים עירוניים. אבל כאשר אנו מסתכלים על שינוי הטמפרטורה ביחס לממוצע, הגורמים הללו פחות משמעותיים. להמחשה - הטמפרטורות בהר ובעמק יהיו שונות זו מזו במהלך הקיץ. אבל, הסטייה מהממוצע בשני המקומות לעומת עונות הקיץ בשנים קודמות יכולה להיות זהה, כלומר, מדובר באותו הפרש טמפרטורות.

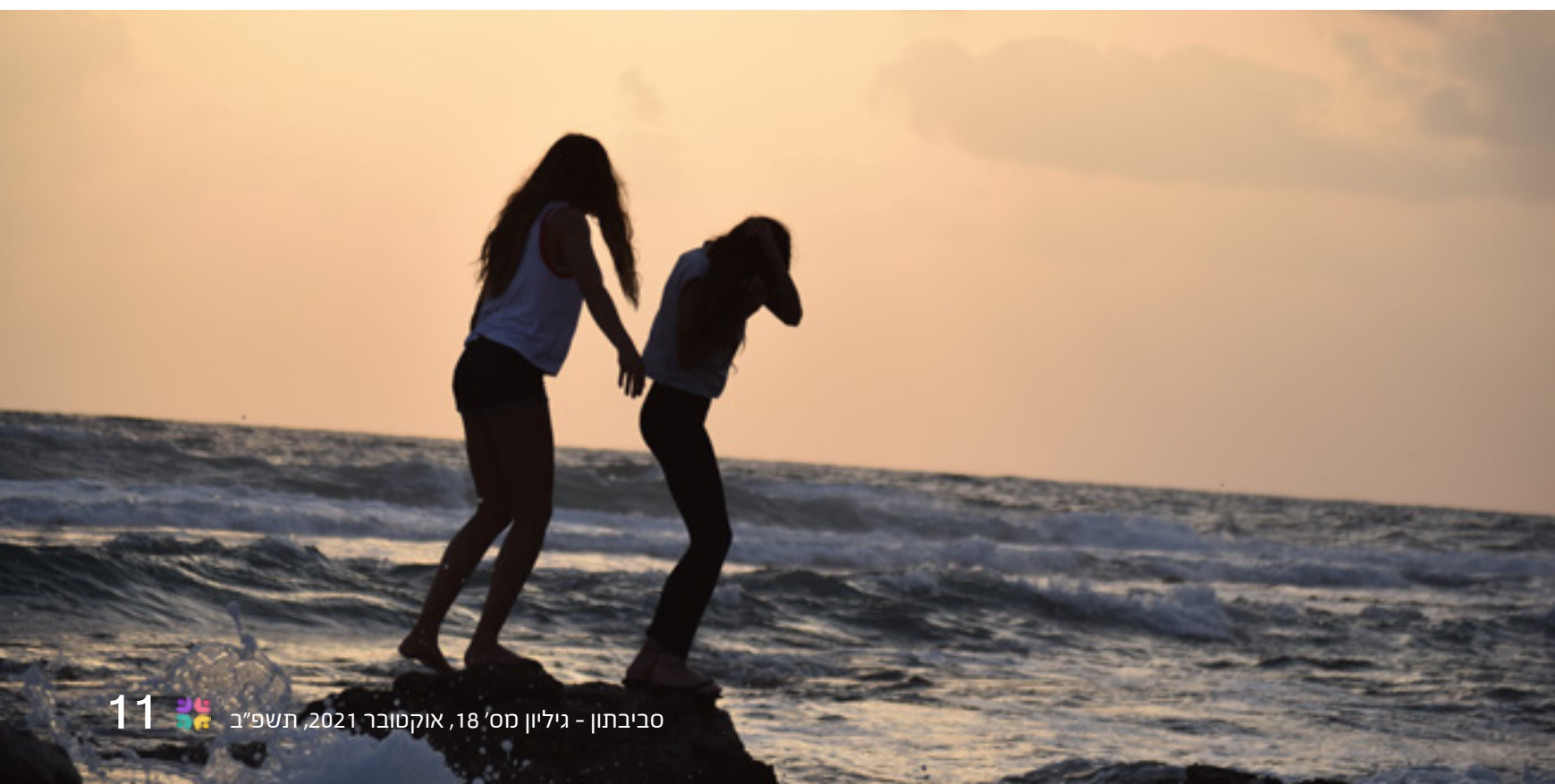
◆ בכל דו"ח של ה-IPCC, נעשית השוואה לטמפרטורה הממוצעת בין השנים 1850-1900 והיא מהווה "קו ייחוס" או קו להשוואה של מידת ההתחממות. מה החשיבות של קו ייחוס? מדוע קו-הייחוס קבוע לכל אורך דו"ח ה-IPCC?

קו ייחוס מאפשר לנו לכמת שינויים ביחס אליו. בבחירת קו הייחוס כדאי לבחור ערך שהוא בעל משמעות. במקרה של ממוצע הטמפרטורה הגלובלית, לקו הייחוס ישנה משמעות: האיזון בין מהימנות מדידות טמפרטורה לבין השפעת האדם על האקלים, כפי שהוסבר למעלה. לאורך כל דו"ח ה-IPCC יש השוואה לתקופה בה בני אדם היו קיימים אבל עדיין לא השפיעו בצורה משמעותית על האקלים.

◆ ביחס לממוצע טמפ' בין השנים 1850-1900, כדור הארץ התחמם בממוצע במעט יותר ממעלה אחת (גרף a1, גרף a2). מדוע עלייה של מעלה אחת כל כך חמורה ומדאיגה? (אפשר לומר, למשל, "מי מרגיש את ההבדל בין 24 ל-25 מעלות?").

חשוב להבהיר שלא מדובר על הבדל בין 24 ל-25 מעלות במהלך היום, אלא על עלייה ממוצעת של מעלה אחת בכל העולם. חלק מהאזורים בעולם יתחממו ביותר ממעלה אחת וחלק יתחממו בפחות ממעלה אחת. לדוגמה, האזור בו ישראל נמצאת צפוי להתחמם ביותר ממעלה אחת.

*אנחנו כבר עדים לנזק שגורמת עלייה ממוצעת של מעלה אחת. לפי הערכות המדענים, אירועי מזג האוויר הקיצוניים ואסונות הטבע שהתרחשו בקיץ 2021 הם תוצאה של שינוי במערכת האקלים המלווה את עליית הטמפרטורה הממוצעת בעולם. על פי התחזיות אפילו עלייה בחצי מעלה בממוצע עולמי היא משמעותית. לדוגמה, ההבדל בין עלייה של 1.5 מעלות צלזיוס לעלייה של 2.0 מעלות צלזיוס, הוא בקיום או כליה של שוניות אלמוגים, בקיום או בהיעדר קרח ימי בקיץ באזור הארקטי (אפשר למצוא דוגמאות נוספות מלוות באיורים באתר של ה-[New York Times](https://www.nytimes.com)).



◆ בגרף b1 מוצגות שלוש עקומות. מה מבטאת כל עקומה? מדוע לדעתכם כל שלוש העקומות מוצגות על מערכת צירים משותפת?

בשחור מופיעות מדידות ישירות (של שינויים בטמפרטורה), ובחום וירוק תוצאות שהתקבלו מחישובים של מודלים. העקומות מוצגות על מערכת צירים משותפת כדי להשוות את התחזיות של מודלים לנתוני אמת כדי שאפשר יהיה להעריך את איכות המודל ואת התרומה היחסית של גורמים שונים להתחממות כדה"א. במקרה שלפנינו, ניתן לראות כי מדידות הטמפרטורה במאה וחמישים השנים האחרונות אינן ניתנות להסבר על ידי מודלים הכוללים אך ורק תהליכים טבעיים (הקו הירוק וטווח אי-הוודאות שלו). על מנת לשחזר את המדידות במודלים האקלימיים, יש לקחת בחשבון גם שינויים הנובעים מפעילות האדם, כמו פליטות של פחמן דו חמצני וגזי חממה אחרים לאטמוספירה (הקו החום וטווח אי-הוודאות שלו).

ד. השלכות נוספות של משבר האקלים

כל אחד מארבעת העשורים האחרונים היה חם יותר מקודמיו וצפויה התחממות נוספת בעתיד. התלמידים של היום נולדו לתוך עידן של התחממות מתמדת. דו"ח ה-IPCC מזכיר מגוון השלכות של התחממות גלובלית שניתן לדון בהן בכיתה, במיוחד בהקשר של ההשפעה על מערכות אקולוגיות וגם בהקשר של ההשפעות על האדם (כלכלי, חברתי, פוליטי, בריאותי). בנוסף, חשוב לזכור כי ההשלכות המוצגות להלן קשורות זו בזו (לדוגמה: התחממות גוררת להמסת קרחונים שגורמת לעלייה במפלס פני הים שגורמת להצפות אזורים מיושבים שמובילה להשלכות חברתיות שונות). בהמשך מוצגות חלק מההשלכות וגם הצעות לדיון בהן. שימו לב, העוצמה של כל אחת מההשלכות האלו הולכת ועולה ככל שדרגת ההתחממות עולה.

1. נסיגת קרחונים בעולם מאז שנות ה-90 של המאה הקודמת. ניתן לדון בהשלכות של המסת קרחונים וגופי קרח גדולים אחרים - למשל [אובדן בתי גידול](#) ועלייה [בגובה פני הים](#) שתוביל להצפות של אזורים מיושבים (ראו גם סעיף 3).

2. [התחממות](#) והחממה (ירידה ב-pH) של השכבה העליונה של האוקיינוסים (700 המטרים העליונים). ניתן לדון בהשלכות אקולוגיות, כמו ההשפעה על [שוניות אלמוגים](#) (קישור [לפעילות](#) בנושא של השפעת החמצת המים על האלמוגים). כמו כן, התפשטות תרמית תורמת אף היא לעלייה במפלס פני הים.

3. עלייה במפלס פני הים. ניתן לדון בהשלכות [אקולוגיות](#) ובהשלכות [החברתיות והכלכליות](#) ([קישור](#) נוסף) או במשמעות התופעה לערי החוף במדינת ישראל.

4. שינויים בבתי גידול ועונות גידול. מיני צומח ובעלי חיים הצפינו או הדרימו בעקבות התחממות כדה"א. ניתן לדון [בפגיעה במגוון ביולוגי](#) או כיצד שינויים בתפוצה של יצורים חיים יכולה גם להוות גורם מאץ להפצת [מחלות](#) כמו [קורונה](#) או מלריה או מחלות [זואוונטיות](#) אחרות.

5. עלייה בתדירות ובעוצמה של אירועי מזג אוויר קיצוניים ואסונות טבע, כגון גלי חום ושריפות, גשמים חזקים והצפות, סופות טרופיות ובצורות.

6. השלכות בריאותיות בשלושה תחומים עיקריים: א. מחלות מידבקות. ב. תמותה. ג. השפעות נשימתיות, קרדיווסקולריות (לב וכלי דם) או נירולוגיות (של מערכת העצבים). [מכתב מערכת ב-NEJM על ידי עורכים של כתבי עת רפואיים](#).

7. השלכות על הכלכלה, על החברה, על הפוליטיקה, על הביטחון התזונתי וכו'.

א. חקיקה ורגולציה - [הרצאה של פרופ' אלון טל](#)

ב. השפעה של משבר האקלים על הכלכלה והחברה - [הרצאה של פרופ'](#)

[שושנה שילה](#), יאיר קראוס.



◆ בגרף b1 אנו רואים תחזיות על פי מודלים שונים. מודלים הם כלי חיוני בחקר מערכות מורכבות כמו מערכת האקלים. מהו מודל וכיצד הוא משמש מדענים לחקר האקלים?

מודלים הם ייצוג של מערכות מורכבות או תהליכים מורכבים. מודל הינו מערכת פשוטה יחסית המדמה במאפייניה החשובים מערכת מסובכת יותר, כמו מערכת אקלים. חשוב להדגיש שמודל הינו קירוב של המציאות ולא המציאות כולה. מודלים הם כלי רב עוצמתי במדע, שמסייע לנו להבין ולהסביר תהליכים וגם לעשות תחזיות לעתיד. מודלים הם אחד מהכלים של מדענים, לצד ביצוע ניסויים ותצפיות (ראו [יחידת הוראה מבוא למדעים](#), משבר האקלים שיעור 6).

מודלים של אקלים הם חלק מרכזי ובלתי נפרד מחקר אקלים כדור הארץ. הם מסייעים למדענים להבין את מערכת האקלים בעבר הרחוק ובהווה, וגם לחזות את האקלים העתידי. המודלים מתארים תהליכים פיזיקליים, כימיים וביולוגיים במערכת כדור הארץ באמצעות משוואות. ישנן רמות מורכבות שונות של מודלים הפשוטים ביותר מבוססים על מאזני אנרגיה בין קרינת אור המגיעה מהשמש לבין קרינת חום הנפלטת מכדור הארץ. מודלים מורכבים יותר כוללים מעברי חומר ואנרגיה באטמוספירה ובאוקיינוסים, ייצוג של עננים ומשקעים, ייצוג של קרחונים, וכן לולאות משוב בין האקלים לצמחייה ולמחזור הפחמן. עם השנים, המודלים נעשים מורכבים ומדויקים יותר הודות לחקר האקלים בעבר הגיאולוגי של כדור הארץ, הבנה עמוקה יותר של הגורמים ושל התהליכים המשפיעים על האקלים, ושיפור בכוח המחשוב. חשוב לזכור שמודלים של אקלים אינם מושלמים ואינם "המציאות", אלא קירוב של המציאות.